

W duchu Kordylewskiego.

Badania geofizyczne w trakcie załogowej eksploracji Księżyca w ramach programu Apollo.

Mateusz Matt Harasymczuk

Analog Astronaut Training Center

matt@astronaut.center

Poniższy tekst jest kompilacją najważniejszych fragmentów książki o tym samym tytule, tj.: "Badania geofizyczne w trakcie załogowej eksploracji Księżyca w ramach programu Apollo" [1] mojego autorstwa. Po dłuższym namyśle, doszedłem do wniosku, że opis badań naukowych księżyca oraz eksperymentów, które zostały wykonane podczas misji Apollo używając innych słów nie wniesie nic nowego do tematu. Pozwoliłem sobie wybrać najważniejsze wg. mnie fragmenty opracowania i przytoczyć je czytelnikowi. Po bardziej wnikliwą analizę, szczegółowe schematy i mapy, a także zdjęcia urządzeń oraz astronautów na powierzchni Księżyca zapraszam do oryginalnej lektury dostępnej online na stronie internetowej <https://alsep.astronaut.center>

1. Wstęp

21 lipca 1969 roku amerykański astronauta Neil Armstrong jako pierwszy człowiek w historii postawił stopę na Księżycu. W okresie 1969-1972 w ramach programu *Apollo* pracę badawczą na powierzchni wykonywało 12 osób podczas sześciu lądowań. Łącznie spędzono tam 300 godzin, a zadania operacyjne poza kapsułą lądownika wykonywano przez 80 godzin. Pieszo oraz za pomocą pojazdu księżycowego przebyto sumarycznie 105 km [2]. W celu analizy geologicznej i geochemicznej przywieziono na Ziemię 381 kg materiału księżycowego [3]. Na chwilę obecną jest to jedyny przykład załogowej eksploracji innego ciała niebieskiego.

Głównym celem dotychczasowych misji załogowych na Księżyc były badania geologiczne i geofizyczne. W ramach pakietu ALSEP (Apollo Lunar Surface Experiments Package), w który astronauta byli wyposażeni podczas eksploracji powierzchni zgromadzono szereg urządzeń do badań geofizycznych Księżyca. Dzięki przeprowadzonym pomiarom udało się określić księżycową aktywność sejsmiczną, zmiany jego pola magnetycznego, wpływ oraz skład wiatru słonecznego, zbadać przewodność cieplną globu księżycowego oraz zbadać niskoenergetyczne wiatry słoneczne.

2. Krótki rys historyczny załogowych programów księżycowych

Załogowe programy kosmiczne były dotychczas prowadzone głównie przez dwa państwa USA i Federację Rosyjską (wcześniej Związek Socjalistycznych Republik Radzieckich). ZSRR był inicjatorem współpracy międzynarodowej. W ramach programu Interkosmos polecili pierwsi kosmonauci niebędący obywatelami wyżej wymienionych mocarstw, a generał Hermaszewski został pierwszym Polakiem, który tego dokonał.

Po drugiej wojnie światowej wyścig zbrojeń przerodził się w tzw. zimną wojnę pomiędzy Stanami Zjednoczonymi Ameryki i Związkiem Socjalistycznych Republik Radzieckich. Za oficjalną datę rozpoczęcia wyścigu kosmicznego (ang. Space Race) przyjmuje się dzień 2 sierpnia 1955 roku. Tego dnia Związek Radziecki odpowiedział na ogłoszoną przez rząd USA cztery dni wcześniej deklarację zamiaru wystrzelenia sztucznego satelity z okazji międzynarodowego roku geofizyki [4].

Po pomyślnym wystrzeleniu sztucznego satelity Sputnika, a później żywego psa Łajki przyszła pora na programy załogowe, tj. amerykańskie Mercury, Gemini, Apollo oraz radzieckie Wostok, Woschod, Sojuz/Progress i N1-L3. Ze względu na obecny plan powrotu człowieka na naturalnego satelitę Ziemi warto w szczególności przyjrzeć się programom księżycowym Apollo oraz N1-L3.

2.1. Radziecki Program Księżycowy (N1-L3)

ZSRR konkurował ze stanami zjednoczonymi w ramach wyścigu kosmicznego. Punktem kulminacyjnym całego Space Race miał być załogowy lot na Księżyc. W tym celu Główny Konstruktor Siergiej Pawłowicz Korolew rozpoczął pracę nad rakietą N1. W ramach programu stworzony został również moduł orbitujący (ros. LOK - *Lunniy Orbitalny Korabl*) oraz lądownik (ros. LK - *Lunniy Korabl*). W 1966 roku kosmonauci zostali przydzieleni do treningów księżycowych. Stworzono grupy, których celami były:

- Soyuz 7K-OK - kwalifikacja statków Soyuz do lotów orbitalnych (lider Gagarin, grupa: Komarow, Nikolajew, Bykowski, Krunow, Gorbatko, Woronow, Kolodin),
- L1/Zond - lotów księżycowych na rakiemie Proton (lider Komarow, grupa: Wołynow, Dobrowolski, Woronow, Kolodin, Zholobow, Bykowski),
- L3 - opracowanie procedur i metodyki lądowania na Księżycu (lider Leonow, grupa: Gorbatko, Krunow, Gagarin, Nikolajew, Szatalow).

W ramach programu N1-L3 zaplanowano 18 misji. Ze względu na przeprowadzenie grupie opracowujących lądowanie Aleksiej Leonow miał największą szansę być nominowany do bycia pierwszym kosmonautą na Księżycu [5].

Rakieta N1 w przeciwieństwie amerykańskiego podejścia składała się nie z trzech a z 5 segmentów (ang. *stage*) oraz 30 silników pierwszego poziomu. Ze względu na złożoność systemu rakieta każdorazowo eksplodowała przy starcie. Po czwartym nieudanym podejściu i utracie nosiciela, zmianie geopolitycznej i przegraniu wyścigu kosmicznego Komitet Centralny Partii postanowił zamknąć program.

Tab. 1. Planowany harmonogram lotów w ramach sowieckiego programu księżycowego [6]

Desygnacja	Planowana data	Cel
2P	1967-02/03	Robotyczny lot na wysokiej eliptycznej orbicie okołoziemskiej
3P	1967-03	Robotyczny lot na wysokiej eliptycznej orbicie okołoziemskiej
4L	1967-05	Misja robotyczna na Księżyc
5L	1967-06	Misja robotyczna na Księżyc
6L	1967-06/07	Pierwszy w historii lot człowieka w strefę wpływu Księżyca
7L	1967-08	Robotyczna lub załogowa misja na Księżyc
8L	1967-08	Robotyczna lub załogowa misja na Księżyc
9L	1967-09	Robotyczna lub załogowa misja na Księżyc
10L	1967-09	Robotyczna lub załogowa misja na Księżyc
11L	1967-10	Robotyczna lub załogowa misja na Księżyc
12L	1967-10	Załogowa misja na Księżyc
13L	b/d	Misja rezerwowa

2.2. Amerykański Program Apollo

Najbardziej ambitnym programem w historii astronautyki był program Apollo. W ciągu niespełna dekady udało się opracować technologię oraz procedury pozwalające człowiekowi stanąć na powierzchni Księżyca i bezpiecznie powrócić na Ziemię. Program Apollo był próbą realizacji oświadczenia prezydenta USA J. F. Kennedy'ego z 12 września 1962 roku [7].

Każda z misji programu Apollo cechowała się innym zadaniem w zależności od kategorii do której była przydzielona [11]. Tab. 2. przedstawia typy misji oraz opis każdej z kategorii.

Krótką charakterystykę misji Apollo [8], [9], [10]:

- Apollo 1 - pożar przy rutynowym teście, załoga poniosła śmierć,
- Apollo 7 - pierwszy start rakiety Saturn V z astronautami w module dowodzenia,

- Apollo 8 - pierwsze załogowe orbitowanie Księżyca, ikoniczne zdjęcie wschodu Ziemi przedstawiające wschód Ziemi nad Księżycem,
- Apollo 10 - pełny test do misji typu G, zbliżenie na 8,4 NM (15,6 km) do powierzchni Księżyca,
- Apollo 11 - pierwsze lądowanie na Księżycu, ikoniczne zdjęcie "Lunar Footprint" przedstawiające odcisk buta astronauty na powierzchni,
- Apollo 12 - najbardziej dokładne lądowanie w programie Apollo, akwizycja kamery sondy Surveyor 3,
- Apollo 13 - wybuch zbiornika z tlenem i dramatyczna walka z czasem aby sprowadzić załogę na Ziemię,
- Apollo 14 - test pojazdu MET na księżycu,
- Apollo 15 - pierwsze wykorzystanie pojazdu LRV,
- Apollo 16 - pierwsza trzydniowa misja (typ J)
- Apollo 17 - ostatnie lądowanie na Księżycu (pierwsza misja w której brał udział naukowiec - geolog), ikoniczne zdjęcie "Blue Marble" - przedstawiający Ziemię z daleka,
- Apollo-Soyuz Test Project - ostatnia misja programu, podczas której doszło do dokowania na orbicie statków Apollo oraz Sojuz i historycznego uścisku dłoni między reprezentantami USA i ZSRR.

Tab. 2. Typy misji w ramach programu Apollo [11]

Typ	Lot załogowy?	Cel	Liczba LEVA	Misja Apollo	Opis
A	nie	Niska Orbita Ziemska	0	Apollo 4, Apollo 6	Test Saturn V i CSM
B	nie	Niska Orbita Ziemska	0	Apollo 5	Test LM
C	tak	Niska Orbita Ziemska	0	Apollo 7	Test CSM
D	tak	Niska Orbita Ziemska	0	planowany Apollo 8, polecał Apollo 9	Test CSM i LM
E	tak	Średnia Orbita Ziemska	0	brak lotów	Test CSM i LM, symulowana misja księżycowa na eliptycznej orbicie MEO apogeum 3,500 NM (6,500 km)
F	tak	Niska Orbita Księżyca	0	Apollo 10	Test CSM i LM, próba generalna przed lądowaniem
G	tak	Lądowanie na Księżycu	1	Apollo 11	Pierwsze lądowanie załogowe na Księżycu

H	tak	Pobyt na księżycu 2 dni	2	Apollo 12, Apollo 13 (planowany), Apollo 14	Precyzyjne lądowanie
I	tak	Pobyt na księżycu 2 dni	3	Scalono z misjami J	badania na orbicie Księżyca, Scientific Instrument Module
J	tak	Pobyt na księżycu 3 dni	3	Apollo 15 (planowany H, zamieniono na J), Apollo 16, Apollo 17, Apollo 18, 19, 20 (planowane jako J)	Extended LM, Lunar Roving Vehicle

3. Eksperymenty geofizyczne na powierzchni Księżyca

Księżyc bombardowany jest wiatrem słonecznych, który składa się z naładowanych cząstek, w większości protonów i elektronów emanujących ze Słońca. Wiatr niesie ze sobą również międzyplanetarne pole magnetyczne [12].

Planeta Ziemia otoczona jest polem magnetycznym, które chroni ją przed bezpośrednim wpływem strumienia pola wysokoenergetycznych cząstek. Księżyc, ma zaniedbywalne pole magnetyczne. Z tego względu powierzchnia Księżyca narażona jest na wpływ szkodliwego promieniowania [12].

Eksperymenty z pakietu Apollo Lunar Surface Experiments Package (ALSEP) były przeznaczone do zbadania szkodliwego wpływu wiatru słonecznego, powierzchni księżycy oraz sejsmiki Księżyca. Część eksperymentów była zaprojektowana aby mierzyć i przysyłać informacje po opuszczeniu powierzchni przez astronautów.

Program ALSEP kosztował 200 mln. USD, wliczając w to zaprojektowanie oraz wytworzenie stacji centralnych, eksperymentów, wsparcia inżynieryjnego w Houston i analizy danych przez laboratoria w USA i na świecie. Koszt operacyjny utrzymania infrastruktury zdalnego wykonywania eksperymentów wynosił 2 mln. USD rocznie. Ceny podane wg. wartości amerykańskiego dolara lat 1969-1972 [13].

Program ALSEP został zamknięty wraz z wyczepianiem budżetu projektu 30 września 1977 roku. W trakcie całego okresu zostało wysłanych 153 tys. poleceń i otrzymano około trylionu bitów informacji naukowych. Mimo wyłączenia infrastruktury naziemnej, część eksperymentów pasywnie emitowała informacje za pośrednictwem fal radiowych. Dane te były przechwytywane i wykorzystywane przez różne instytucje tj. Jet Propulsion Laboratory w celu opracowywania pomiarów geodezyjnych, astrometrycznych oraz nawigacji statków kosmicznych [13].

3.1. O pakiecie ALSEP

W trakcie programu Apollo dwóch zestawów eksperymentów:

- Early Apollo Surface Experiments Package (EASEP),
- Apollo Lunar Surface Experiments Package (ALSEP).

Pakiet EASEP był wykorzystany podczas misji Apollo 11. W kolejnych misjach, tj. Apollo 12, 14, 15, 16 i 17 zastosowano konfigurację w wariantach zwanych macierzami ALSEP (ang. *ALSEP Array*):

Tab. 3. Warianty pakietu ALSEP w poszczególnych misjach

Misja	Nazwa zestawu
Apollo 11	EASEP
Apollo 12	ALSEP Array A
Apollo 13	ALSEP Array B
Apollo 14	ALSEP Array C
Apollo 15	ALSEP Array A-2
Apollo 16	ALSEP Array D
Apollo 17	ALSEP Array E

Tab. 4. Lista eksperymentów zrealizowanych w trakcie misji Apollo

Skrót	Nazwa eksperymentu	Dziedzina	Zrealizowano podczas misji Apollo
ASE	Active Seismic Experiment	Sejsmika	14, 16
CCIG	Cold Cathode Ion Gauge	Magnetometria	12, 14, 15
CPLEE	Charged Particle Lunar Environmental Experiment	Elektromagnetyzm	14
CRD	Cosmic Ray Detector	Radiometria	16, 17
HFE	Heat Flow Experiment	Radiometria	15, 16 (nieskutecznie), 17
LACE	Lunar Atmospheric Composition Experiment	Badania atmosferyczne	17
LAD	Lunar Atmospheric Detector	Badania atmosferyczne	11, 12
LDD	Lunar Dust Detector	Petrofizyka	11, 12, 14, 15
LEAM	Lunar Ejecta and Meteorite Experiment	Wulkanizm	17
LID	Lunar Ionosphere Detector	Elektromagnetyzm	12
LPM	Lunar Portable Magnetometer	Magnetometria	14, 16
LRRR	Laser Ranging Retro-reflector	Astrometria	11, 14, 15

LSG	Lunar Surface Gravimeter Experiment	Grawimetria	17
LSM	Lunar Surface Magnetometer	Magnetometria	12, 15, 16
LSPE	Lunar Seismic Profiling Experiment	Sejsmika	17
NPE	Neutron Probe Experiment	Radiometria	17
PSE	Passive Seismic Experiment	Sejsmika	12, 14, 15, 16
PSEP	Passive Seismic Experiment Package	Sejsmika	11
SEP	Surface Electrical Properties Experiment	Elektromagnetyzm	17
SIDE	Suprathernal Ion Detector Experiment	Elektromagnetyzm	12, 14, 15
SWCE	Solar Wind Composition Experiment	Elektromagnetyzm	11, 12, 14, 15, 16
SWS	Solar Wind Spectrometer	Elektromagnetyzm	12, 15
TGE	Traverse Gravimeter Experiment	Grawimetria	17

3.2. Active Seismic Experiment (ASE)

Aktywny eksperyment sejsmiczny polegał na detonacji niewielkich ładunków wybuchowych w celu wzbudzenia fal sejsmicznych i pozwalał na uzupełnienie danych zebranych podczas pasywnego eksperymentu PSE, od którego różnił się skalą i źródłem energii.

Dwa aktywne eksperymenty sejsmiczne zostały wykonane podczas misji Apollo 14 i 16. W trakcie misji Apollo 17 wykonano eksperyment profilowania sejsmicznego w celu określenia struktury górnej warstwy powierzchni Księżyca do głębokości 1000 m.

Prędkość rozchodzenia fali sejsmicznej określono na od 0.1 do 0.3 km/s. Wartości te korelują się z prędkościami rozchodzenia się fal sejsmicznych w skałach brekcji o wysokim stopniu porowatości oraz spękaniach spowodowanych długotrwałym bombardowaniem meteorytami powierzchni Księżyca. Miąższość regolitu księżycowego na powierzchni określono na 8,5 metrów

3.3. Cold Cathode Ion Gauge (CCIG)

W celu pomiaru liczby oraz rodzaju jonów na Księżycu wykonano dwa eksperymenty: Suprathernal Ion Detector Experiment (SIDE) i Cold Cathode Ion Gauge (CCIG). Badania te były ze sobą ściśle skorelowane i wykorzystywały jedno urządzenie połączone krótkim kablem elektrycznym.

Z racji ustawienia eksperymentu w trakcie poszczególnych faz orbity Księżyca zaobserwowano pole strumienia jonów (ang. *flux*) w zewnętrznej warstwie magnetosfery (ang. *magnetosheath*). Detektor zarejestrował również zjawiska częściowo związane z oddziaływaniem na powierzchnię Księżyca jak również na jego ogon magnetosferyczny (ang. *magnetotail*). Dane z eksperymentu zostały wykorzystane do określenia potencjału powierzchni Księżyca, zbadania

parametrów plazmy przy powierzchni, jak również określenia spektrum masowego jonów i badań strumienia pola jonowego w ogonie magnetosferycznym [14].

Do badania wykorzystano kierunkowy sensor zorientowany w płaszczyźnie ekliptycznej pod kątem 15 stopni od lokalnego Księżycowego południka. Wyniki pomiarów określiły poziom ciśnienia w maksymalnym dolnym zakresie urządzenia, tj. $10E-12$ Torr. Dla porównania Ziemska atmosfera na poziomie morza przyjmuje wartość 760 Torr.

3.4. Charged Particle Lunar Environmental Experiment (CPLEE)

Eksperyment Charged Particle Lunar Environmental Experiment (CPLEE) polegał na pomiarze energii cząstek wiatru słonecznego (protonów i elektronów) docierających do powierzchni Księżyca. Dane pozwoliły na wyznaczenie rozkładu energii cząstek oraz zmierzenie ich wpływu na układ Ziemia-Księżyc. Ponadto określono ich oddziaływanie na zorze polarne występujące na Ziemi i pasy Van Allena. Pozwoliło to na dokładniejsze określenie charakterystyki Ziemskiego pola magnetycznego. Zbadano również procesy zachodzące w strefie napływu fal promieniowania słonecznego podczas uderzania o powierzchnię Księżyca jak również wpływ naładowanych cząstek wiatru słonecznego na środowisko księżycowe.

Badanie wykonano przy pomocy dwóch spektrometrów zawierających sześć detektorów cząstek: pięciu C-kształtnych kanalikowych powielaczy elektronowych. Zbadano protony i elektrony w przedziale energetycznym 40 KeV do 70 KeV.

Wykazano, że Księżyc poddawany jest bombardowaniu niskoenergetycznych fotoelektronów. Niespodziewanym odkryciem podczas eksperymentu okazało się zaobserwowanie elektronów w ogonie magnetycznym Ziemi. Cząstki posiadały potencjał porównywalny z wartościami wiązania w Ziemskich zorzach polarnych.

3.5. Cosmic Ray Detector (CRD)

W bezpośrednim otoczeniu kosmicznym Ziemi zaobserwować można trzy główne rodzaje promieniowania: wiatr słoneczny o stałym natężeniu, cząstki pochodzące z rozbłysków słonecznych (ang. Solar Particle Event, SPE) oraz promieniowanie kosmiczne (ang. Galactic Cosmic Rays, GCR). Mimo iż promieniowanie kosmiczne stanowi 1% całości spektrum, jest ono najbardziej zagrażające życiu i zdrowiu astronautów. GCR złożone jest z cząstek o ekstremalnie dużych energiach (od 100 MeV do 1 GeV) i prędkościach zbliżonych do prędkości światła. Zaobserwowano również cząstki UHECR (ang. Ultra-High-Energy Cosmic Rays) o energii dochodzącej do $3 \times 10E20$ eV [15]. Promieniowanie kosmiczne ma złożony charakter i występuje w postaci zarówno korpuskularnej jak i elektromagnetycznej. Cząsteczkowa składowa

promieniowania zawiera: protony (90%), cząstki alfa, głównie (jądra helu) - 9% i elektrony (ok. 1%). 1-2% promieni kosmicznych składa się z jąder cięższych pierwiastków. Promieniowanie kosmiczne oddziałuje ze wszystkich kierunków, a ich źródło pierwotne na chwilę obecną jest nieokreślone. Obecnie najpopularniejszą teorią pochodzenia promieniowania kosmicznego są wybuchy supernowych, występujące nierzadko poza galaktyką Drogi Mlecznej.

Przedmiotem badania CRD było określenie wpływu promieniowania kosmicznego na różne materiały, badanie cząstek niskoenergetycznych oraz dokonanie pomiaru neutronów pochodzących z powierzchni Księżyca, a także określenie składu i kierunku padania promieniowania kosmicznego.

W badaniu wykorzystano panele z Lexanu, Teflonu oraz trioctanu celulozy firmy Kodacel. Cząsteczki padające na powierzchnię paneli pozostawiały ślady mikrościeżek. W eksperymencie zanotowano rekordowo wysokie wartości cząstek niskoenergetycznych oraz neutronów pochodzących z powierzchni Księżyca.

3.6. Heat Flow Experiment (HFE)

Heat Flow Experiment (HFE) wykonany w trakcie Apollo 15 i Apollo 17 miał na celu pomiar utraty ciepła przez Księżyc na skutek promienowania [15].

Wyniki eksperymentu posłużyły do określenia poziomu radioaktywności jako źródła długotrwałego generowania temperatury we wnętrzu oraz określenia parametrów dla modelu termicznej historii Księżyca [16].

Badania dokonano poprzez stworzenie dwóch otworów wiertniczych w regolicie księżycowym o głębokości od 1,6 m do 2,3 m. Za pomocą platynowych termometrów oporowych dokonano pomiarów temperatury na wielu poziomach każdego z otworów. Temperatura w trakcie nocy: 76 K (-197°C), w ciągu dnia: 358 K (+85°C). Temperatura pod powierzchnią regolitu księżycowego na głębokości 1,5 m była stała i przyjmowała wartość 253 K (-20°C).

Na podstawie pomiarów określono, iż wnętrze Księżyca jest znacznie cieplejsze niż jego powierzchnia. Z tego powodu znaczna ilość ciepła z wnętrza jest wypromieniowywana w kosmos. Źródłem ciepła jest głównie rozpad radionukleotydów pochodzenia naturalnego takich jak tor, uran czy potas. Proces emisji promieniowania jest odpowiedzialny za zwiększanie temperatury we wnętrzu Księżyca. Prędkość utraty ciepła w postaci wypromieniowywania w kosmos jest znaczącym czynnikiem wpływającym na tektonikę (tworzenie się uskoków i fałdowań powierzchni na skutek deformacji wewnętrznej) oraz na aktywność wulkaniczną.

3.7. Lunar Atmospheric Composition Experiment (LACE)

Księżyc posiada bardzo cienką atmosferę zwaną egzosferą sięgającą powierzchni (ang. *Surface Bound Exosphere*). Ze względu na niewielkie oddziaływanie grawitacyjne Księżyca gazy wchodzące w skład tej struktury łatwo ulatniają się w przestrzeń kosmiczną. Ze względu na otrzymywanie dużych energii na skutek słonecznego podgrzewania lekkie atomy takie jak hel, wyparowują w przestrzeń kosmiczną w ciągu kilku godzin. Dla cięższych atomów czas ten jest odpowiednio dłuższy. Jednakże w procesie jonizacji wywołanej przez promieniowanie UV pochodzące od słońca, atomy te mogą być uniesione na znaczne odległości od powierzchni Księżyca. Proces ten może trwać nawet do kilku miesięcy.

Ze względu na tempo z którym atomy uciekają w przestrzeń kosmiczną, musi istnieć ciągle źródło cząsteczek aby utrzymać cienką warstwę atmosfery. Takim źródłem są w głównej mierze przechwycone cząsteczki wiatru słonecznego oraz materiał uwolniony podczas zderzeń komet i meteoroidów z powierzchnią Księżyca. Dla atomów, głównie helu-4 oraz argonu-40 źródłem może być również odgazowywanie wnętrza Księżyca.

Do pomiaru składu atmosfery księżycowej wykorzystano spektrometr masowy, dzięki któremu określono, iż w skład atmosfery księżycowej wchodzi głównie trzy gazy: neon, hel, wodór w równych proporcjach. Zaobserwowano również niewielkie ilości metanu, dwutlenku węgla, amoniaku oraz wody. Ponadto zaobserwowano argon-40, którego znacznie większe wartości były notowane w trakcie sejsmicznej aktywności. Argon-40 jest produktem rozpadu radioaktywnego potasu-40 we wnętrzu Księżyca.

3.8. Lunar Atmospheric Detector (LAD)

Naukowym celem Lunar Atmospheric Detector (LAD) było określenie gęstości, temperatury i zmian w atmosferze Księżyca. Eksperyment LAD polegał na pomiarze ciśnienia całkowitego neutralnych (nieaktywnych) cząstek, a następnie za pomocą urządzenia wykrywającego jonosferę (ang. Ionosphere Detector) pomiar składu zjonizowanych (aktywnych) cząsteczek. Oczekiwano, iż rozkład gęstości będzie się zwiększał podczas dnia księżycowego oraz spadał w trakcie nocy [17].

Pomiary te miały na celu poszerzenie zrozumienia procesów zachodzących na powierzchni Księżyca. Procesy erozyjne widoczne w próbkach pobranych podczas EVA w trakcie Apollo 11 były wskaźnikiem do zjawisk odmiennych do tych zachodzących na Ziemi.

Dzięki badaniu udało się określić skład pierwiastków oraz izotopów gazów szlachetnych, tj. hel, neon i argon, we wietrze słonecznym.

3.9. Lunar Dust Detector (LDD)

Część eksperymentów wykonywanych w ramach programu Apollo miała działać również po opuszczeniu Księżyca przez astronautów. Przed lądowaniami w ramach programu Apollo sądzono, że urządzenia w ramach pakietu ALSEP pokryte zostaną warstwą pyłu uniesionego w skutek startu LM. Przyczyną zanieczyszczenia miały być również inne źródła w wyniku długotrwałej ekspozycji na szkodliwe czynniki środowiskowe.

Eksperyment Lunar Dust Detector (LDD) wykonano podczas misji Apollo 11, 12, 14 i 15. Badanie zostało zaprojektowane w celu pomiaru złogów regolitu Księżycowego na urządzeniach elektronicznych i mechanicznych. Informacja ta była wyliczana na podstawie różnicy w wartości luminacji zarejestrowanej przez fotokomórki paneli fotowoltaicznych w czasie. Obserwowano również poziom zniszczeń paneli przez wysokoenergetyczne promieniowanie jak również poziom odbitego promieniowania podczerwonego i temperaturę powierzchni Księżyca [12]. Okazało się, że warstwa pyłu zgromadzona na urządzenia okazała się być znacznie niższa od oczekiwanej.

3.10. Lunar Ejecta and Meteorite Experiment (LEAM)

Eksperyment Lunar Ejecta and Meteorite Experiment (LEAM) był przeprowadzony podczas misji Apollo 17. Wykonano go w celu zbadania częstotliwości i charakteru uderzania małych obiektów o powierzchnię Księżyca i pomiaru materiału wyrzucanego w skutek takiego zdarzenia.

Księżyc jest ciałem niebieskim posiadającym pole grawitacyjne i zaniedbywalną warstwę atmosfery. Trajektoria obiektów kosmicznych przelatujących w pobliżu Księżyca jest zakrzywiana w polu grawitacyjnym i może prowadzić do zderzenia mniejszych odłamków z jego powierzchnią. Ze względu na cienką warstwę atmosfery nie będącą w stanie w skutek tarcia zniszczyć tych obiektów, uderzają one z dużymi prędkościami w grunt Księżyca. Przyczynia się to do wyrzucenia regolitu, oraz materiału z innych warstw skorupy. Drobne cząsteczki pyłu przyciągane niewielkim polem grawitacyjnym powoli opadają na powierzchnię tworząc drobnoziarnistą warstwę regolitu [18].

Oczekiwano, iż eksperyment będzie w stanie wykryć zarówno obiekty pochodzenia zewnętrznego, tj. odłamki komet czy pył międzygwiazdny, jak również cząstki wyniesione w skutek kolizji innych obiektów o powierzchnię Księżyca, np. człony rakiety Saturn, odrzucony moduł LM, itp.

Eksperyment składał się z trzech płyt sensorów skierowanych w różne kierunki. Pozwalało to na pomiar prędkości i kierunku poruszania się uderzających obiektów. Analiza rezultatów

wykazała, że drobny pył stanowiący warstwę regolitu księżycowego jest transportowany z niewielką prędkością pomiędzy różnymi regionami w trakcie księżycowego wschodu słońca.

3.11. Lunar Ionosphere Detector (LID)

Naukowym celem eksperymentu Lunar Ionosphere Detector (LID) było zbadanie naładowanych cząstek w księżycowej atmosferze. W połączeniu z Lunar Atmospheric Detector (LAD) zbadano zarówno cząsteczki naładowane jak i nieposiadające ładunku. Mimo zebrania niewielkiej próbki materiału badawczego, wiedza na temat księżycowej jonosfery, jej gęstości i składu przyczyniła się do zrozumienia procesów chemicznych, radioaktywnych oraz wulkanicznej aktywności, jak również składu chemicznego wiatru słonecznego. Siła uderzenia meteorytów w powierzchnię księżyca powoduje wyparowanie zarówno materiału meteorytowego jak również regolitu księżycowego. Podczas gdy te czynniki przyczyniają się do tworzenia jonosfery i atmosfery, siły oddziałujące na wyrzucony materiał powodują ich ucieczkę w kosmos. Siłami tymi są: niska wartość przyciągania grawitacyjnego, wysoka fluktuacja temperaturowa jak również aktywność wiatru słonecznego, która może również przyczyniać się do tworzenia jak i niszczenia wyżej wymienionych warstw. Cząsteczki wiatru słonecznego są głównymi składowymi jonosfery, mimo iż zaobserwowane z Ziemi księżycowe "gorące strefy" (ang. heat spot) sugerują uwalnianie się gazów z jego wnętrza.

Składał się z dwóch wykrzywionych płytek analizatora, mierzących energię dodatnich jonów. Jedna płytka mierzyła jony z energiami w zakresie od 0,2 eV do 48,6 eV. Zawierała również filtr prędkości w postaci przecinającego się pola magnetycznego i elektrycznego. Urządzenie było zaprojektowane do spowalniania jonów z prędkościami rzędu od 4 km/s do 935 km/s.

Badając charakter spowolnienia i prędkość pierwotną uzyskano informację na temat masy cząstek wiatru słonecznego dla energii od 10 eV do 3500 eV.

3.12. Lunar Portable Magnetometer (LPM)

Metoda mapowania różnic pola magnetycznego jest standardową procedurą wykorzystywaną na Ziemi w badaniach prospekcyjnych. Wiele złóż naturalnych i obiektów podziemnych może powodować anomalie pola magnetycznego. Średnia wartość pola magnetycznego Ziemi wynosi $50\mu\text{T}$ (50000 nT), a anomalie na poziomie kilkudziesięciu tysięcy Tesli są częste. Ze względu na fakt, iż pole magnetyczne Księżyca jest około trzy rzędy wielkości mniejsze od Ziemskiego, oczekiwane wartości anomalii są proporcjonalnie mniejsze.

Pierwszy pomiar dokonano w niewielkiej odległości od punktu lądowania, jednakże poza zasięgiem wpływu pola magnetycznego lądownika LM. Zmierzona wartość wynosiła 43 nT.

Drugiego pomiaru dokonano na krawędzi krateru Cone (ang. Cone Crater). Zarejestrowano wartość wynoszącą 103 nT. Pomiary te były znacznie przewyższające wartości oczekiwane. Wcześniejsze dane zebrane z wykorzystaniem orbitujących Księżyc satelitów wykazały jednoznacznie, że uśredniona wartość pola magnetycznego nie może przekraczać 10 do 12 nT. Efekt ten jest rezultatem naturalnego procesu magnetyzacji skał Księżycowych. Zachodzenie tego procesu występuje również na Ziemi np. w naturalnie występującym i silnie magnetyzującym mineralu lodestone.

3.13. Laser Ranging Retro-reflector (LRRR)

Dalmierz laserowy pozwala na precyzyjne określenie odległości oddalonych od siebie obiektów. Składa się z dwóch części. Jedną jest generatorem wiązki lasera, a druga zawiera lustro, lub lustro odbijające promień w kierunku padania. Na podstawie znanej prędkości światła oraz pomiaru czasu powrotu wiązki możliwe jest precyzyjne wyznaczenie odległości między dwoma elementami zestawu. Mimo faktu, iż Księżyc posiada wartość albedo na średnim poziomie 0.136 i kierunkowo odbija promień, to proces odbicia ma charakter nielambertowski, tj. nierównomiernie rozprasza światło we wszystkich kierunkach. Moc odbitego promienia jest niewystarczająca aby móc precyzyjnie określić jego odległość od Ziemi.

Powierzchnia odbijająca pasywnego eksperymentu Laser Ranging Retro-reflector (LRRR) składała się z kostek topionej krzemionki. Dla misji Apollo 11 i Apollo 14 liczba kostek wynosiła 100. W misji Apollo 15 wykorzystywano matryce posiadające 300 kostek. Powierzchnię zaprojektowano tak, aby odbijała światło lasera równoległe do kąta jego padania.

Wykorzystując dane precyzyjnie pomierzonych odległości, ustalono, iż powierzchnia Księżyca ulega znacznym ugięciom i zakrzywieniom na skutek oddziaływania pola grawitacyjnego Ziemi. Do zmian tych dochodzi w trakcie różnych pozycji Księżyca na orbicie okołoziemskiej.

3.14. Lunar Surface Gravimeter Experiment (LSG)

Eksperyment Lunar Surface Gravimeter Experiment (LSG) był wykonany tylko raz, tj. podczas misji Apollo 17. Głównym celem LSG było potwierdzenie istnienia fal grawitacyjnych zgodnie z przewidywaną przez Einsteina teorią. W tym celu dokonano pomiaru odpowiedzi Księżyca na przeciągania pływowe (ang. *tidal forces*) Ziemi. Badano również wolną oscylację Księżyca w cyklach 15-sto minutowych i dłuższych. Zmierzono pionową składową zjawisk sejsmicznych o częstotliwościach dochodzących do 16 Hz. Uzupełniało to dane uzyskane z eksperymentu Passive Seismic Experiment (PSE) z misji Apollo 12, 14, 15 i 16 [18].

Błąd projektu urządzenia uniemożliwił otrzymanie naukowo znaczących wyników

3.15. Lunar Surface Magnetometer (LSM)

Pole magnetyczne Ziemi i Księżyca składa się z dwóch elementów składowych: jednej zmieniającej się w czasie oraz drugiej stabilnej. Część niestabilna jest wynikiem przejścia fal elektromagnetycznych. Część stabilna pola magnetycznego Ziemi (która wchodzi w interakcję z kompasem) przyjmuje wartości od 35 000 nT na równiku do 60 000 nT na biegunach. Wartość gamma pola magnetycznego Księżyca wynosi 6 do 100 nT. Jest to spowodowane obecnością naturalnie występującego zjawiska magnetyzmu w skałach księżycowych. Minerale te powstały na wczesnym etapie ewolucji Księżyca, gdy pole magnetyczne było znacznie silniejsze [17], [14], [15].

Obecnie uznawana teoria wyjaśnia przyczynę naturalnego powstawania zjawiska magnetyzmu skał. Gdy meteoryt znacznej wielkości uderzy w powierzchnię Księżyca w skutek impaktu i wysokich temperatur następuje wyparowanie materiału skalnego, jak również wyrzut w kosmos części powierzchni. Obiekty powstałe w skutek tego działania formują chmury odłamków gruzu i gazów. Chmury te są większe niż Księżyc. W wyniku uwolnienia znacznej ilości ciepła podczas zderzenia, większość gazu zamienia się w zjonizowaną plazmę, w której atomy są pozbawione jednego lub więcej elektronów. Taka plazma pozbawiona jest własności magnetycznych. Chmura rozprzestrzeniając się wokół Księżyca spycha frontalnie własne pole magnetyczne Księżyca. Do przemieszczenia plazmy wokół Księżyca dochodzi w ciągu około 5 minut. W skutek czego zepchnięte pole magnetyczne stanie się znaczne. W tym czasie odłamki skalne opadną na powierzchnię Księżyca koncentrując się na krańcach antypodalnych. W przypadku gdy formacje skalne opadną w trakcie wpływu wysokiego pola magnetycznego, mogą przejść proces nagłej magnetyzacji (ang. *shock magnetization*). Dla porównania, gdy skała zostaje poddana uderzeniu przez młot, może nagle stracić własności magnetyczne i przyjąć te z otaczającego regionu [18], [12].

Elektryczne własności materiału tworzącego Księżyc determinują jego pole magnetyczne. W wypadku gdyby Księżyc był doskonałym izolatorem fala elektromagnetyczna wiatru słonecznego przeszła by przez niego niezakłócona i połączyła linie pola wokół Księżyca. W skutek czego przepływający prąd wytworzy pole magnetyczne. Pole to niesione z wiatrem słonecznym przyczynia się do powstania systemu prądów elektrycznych na Księżycu i jego powierzchni. Prądy te, mogą tworzyć pole magnetyczne, próbujące przeciwdziałać polu jonowemu wiatru słonecznego. Przyczyniłoby się to do zmiany łącznego pola magnetycznego zmierzonego na powierzchni Księżyca. Gdyby zaś istniały struktury geologiczne zachowujące się jak przewodnik, prąd elektryczny przepłynąłby przez niego [12], [15].

Celem badawczym eksperymentu był pomiar pola magnetycznego powierzchni Księżyca oraz ustalenie jak naładowane cząsteczki wiatru słonecznego wchodzi w interakcję z polem magnetycznym. Część cząstek jest wchłaniana przez warstwy powierzchniowe Księżyca, a pozostała część może zostać odbita lub przeniesiona na drugą jego stronę.

Pomiaru dokonano niezależnie za pomocą równoległego zbadania różnic wartości potencjału elektrycznego wiatru słonecznego przy powierzchni jak również niezakłóconego odczytu w trakcie sondowania z orbity. W tym celu wykorzystano misję robotyczną Explorer 35 orbitującą wokół Księżyca.

Księżyc w przeciwieństwie do Ziemi nie posiada pola magnetycznego. Jest to spowodowane brakiem wewnętrznego procesu wywołującego efekt dynamo. Magnetometr wykrył nikłe pole magnetyczne. Eksperyment LSM udokumentował stałą wartość na poziomie 38 nT dla miejsca lądowania Apollo 12 i 6 nT dla Apollo 15. Uważa się, że magnetyzm powierzchni Księżyca jest pozostałością z czasu, gdy jego pole magnetyczne było aktywnie tworzone przez jądro

3.16. Lunar Seismic Profiling Experiment (LSPE)

Lunar Seismic Profiling Experiment (LSPE) jest podobny w założeniu do innych eksperymentów sejsmicznych wykonywanych w ramach pakietu ALSEP. Niewielkie zmiany dotyczą kwestii projektowych. Urządzenie zbierało dane sejsmiczne z sieci 4 geofonów ułożonych w centrum, oraz w kątach 90-cio metrowego trójkąta równobocznego. Ładunki wybuchowe na powierzchni wywoływały fale sejsmiczną o różnej mocy w celu profilowania sejsmicznego punktu lądowania Apollo 17 [18].

3.17. Neutron Probe Experiment (NPE)

Górne warstwy powierzchni księżyca składają się z regolitu księżycowego. W jego skład wchodzi grunt oraz drobne fragmenty skalne wytworzone w trakcie ciągłego procesu zderzania meteorytów o Księżyc. Na skutek impaktu zostaje uformowany krater, a materiał skalny zostaje wyrzucony. W zależności od rozmiaru meteorytu oraz jego prędkości siła uderzeniowa może unieść materiał na różne odległości. Proces ten powtarzany przez miliardy lat spowodował rozdrobnienie materiału skalnego do postaci pyłu, który jest dobrze wymieszany z innym materiałem skalnym.

Gdy wysokoenergetyczne cząstki promieniowania kosmicznego uderzają o powierzchnię Księżyca, reakcje jądrowe pomiędzy protonami i atomami w podłożu powodują emisję neutronów. Cząstki te mogą przenikać niewielkie głębokości wewnątrz regolitu. Neutrony są docelowo wchłaniane przez inne atomy, a skutkujące tym reakcje jądrowe prowadzą do formowania się radioaktywnych izotopów, które później ulegają rozpadowi do form stabilnych. Te radionukleotydy

pozwalają na określenie tempa mieszania się warstw regolitu. Ze względu na to, że neutrony mogą jedynie spenetrować niewielkie odległości wewnątrz warstw osadowych regolitu. Znalezienie radioaktywnych cząstek na większych głębokościach świadczy o mieszaniu warstw (do mierzonej głębokości) w czasie mniejszym niż czas rozpadu izotopu. Pomiar mieszania się regolitu wymaga trzech rzeczy [18]:

- dużej liczby radioaktywnych cząstek w próbkach rdzeni przywiezionych przez astronautów na Ziemię,
- znania prędkości rozkładu radionukleotydów (określonych w badaniach laboratoryjnych na Ziemi),
- prędkości tworzenia radioaktywnych izotopów w wyniku bombardowania neutronami, wg. pomiaru z eksperymentu Neutron Probe Experiment (NPE).

W wyniku badania określono, iż do mieszania się warstw na głębokości 1 cm dochodzi raz na milion lat, a mieszanie się warstwy 1 metra zachodzi co miliard lat. Tempo zostało oszacowane na podstawie określenia liczby radioaktywnych izotopów w skorupie księżycowej pobranej z rdzenia otworu wiertniczego jak również na podstawie chemicznych pomiarów tych próbek

3.19. Passive Seismic Experiment (PSE)

Eksperyment Passive Seismic Experiment (PSE) wykonano w celu określenia właściwości podpowierzchniowych i pomiaru ekstremalnie niewielkich wibracji powierzchni księżycowej spowodowanej przez odległe trzęsienia ziemi, jak również wywołane przez człowieka eksplozje i uderzenia statków kosmicznych.

Passive Seismic Experiment (PSE) badał propagację fal sejsmicznych przez Księżyc i pozwolił na bardzo szczegółowe określenie jego wewnętrznej struktury.

W ciągu roku na Ziemi dochodzi do ponad 1 mln trzęsień ziemi. Na księżycu zarejestrowano ich około 300 i o znacznie mniejszej skali. W przypadku zaobserwowania zjawiska sejsmicznego przez trzy lub więcej oddalonych od siebie sejsmometrów, czas i lokacja wydarzenia mogła zostać określona z dużą precyzją. Ze względu na fakt, iż fale sejsmiczne odległych wydarzeń podróżują głębiej wewnątrz struktury Księżyca niż fale zjawisk bliskich, poprzez pomiar drgań na różnych odległościach od sejsmometru możliwe jest określenie prędkości rozchodzenia się fal sejsmicznych oraz ich charakterystyka głębokościowa [18].

Sejsmometr użyty podczas misji Apollo 11 zwracał dane tylko przez trzy tygodnie ale pozwolił na zarejestrowanie użytecznych sygnałów. Bardziej zaawansowane urządzenie zastosowano podczas misji Apollo 12, 14, 15 i 16. Dane sejsmiczne uzyskiwano do końca września

1977 r. Każdy z sejsmometrów mierzył wszystkie trzy składowe przesunięcie powierzchni, tj. góra-dół, północ-południe, wschód-zachód [19].

Eksperyment wykorzystał badanie propagacji fal sejsmicznych przez Księżyc i pozwolił na bardzo szczegółowe określenie jego wewnętrznej struktury. W przypadku zaobserwowania zjawiska sejsmicznego przez trzy lub więcej oddalonych od siebie sejsmometrów, czas i lokalizacja wydarzenia mogła zostać określona z dużą precyzją. Codziennie rejestrowano uderzenia meteorytów oraz średnio dwa księżycowe trzęsienia ziemi miesięcznie. Pomiar był dokonywany do głębokości 800 km. W ciągu ośmiu lat z zbierania danych przez urządzenia pakietu ALSEP, sejsmometry zarejestrowały 10 tys. wstrząsów tektonicznych i 2000 uderzenia meteorytów.

Uważa się że skorupa jest wielowarstwowa i ma miąższość 50 km. Złożona jest z 20 kilometrowej warstwy przypowierzchniowej. Górna część płaszcza księżyca ma miąższość 500 km i złożona jest z jest jednorodnej warstwy oliwinu oraz piroksenu. Poniżej tej wartości dane sejsmiczne wskazują na bogate w żelazo jądro.

3.20. Passive Seismic Experiment Package (PSEP)

Eksperyment Passive Seismic Experiment (PSE) wykonano w celu określenia właściwości przypowierzchniowych i pomiaru ekstremalnie niewielkich wibracji powierzchni księżycowej spowodowanej przez odległe trzęsienia ziemi, jak również wywołane przez człowieka eksplozje i uderzenia statków kosmicznych.

Passive Seismic Experiment (PSE) badał propagację fal sejsmicznych przez Księżyc i pozwolił na bardzo szczegółowe określenie jego wewnętrznej struktury.

Sejsmometr użyty podczas misji Apollo 11 zwracał dane tylko przez trzy tygodnie ale pozwolił na zarejestrowanie użytecznych sygnałów. W czasie około miesięcznej pracy operacyjnej urządzenia zarejestrowano blisko 200 kolizji meteorytowych. W późniejszych misjach eksperyment został zmodyfikowany i występował pod nazwą Passive Seismic Experiment (PSE).

3.21. Surface Electrical Properties Experiment (SEP)

Surface Electrical Properties Experiment (SEP) wykonano aby określić przewodność elektromagnetyczną, absorpcję i charakterystykę odbicia powierzchni Księżyca oraz warstw przypowierzchniowych w celu późniejszego wytworzenia modelu geologicznego górnych warstw skorupy księżyca.

Częstotliwości fali generowanej przez transmiter pozwalały na określenie właściwości obiektów podpowierzchniowych. Obecność wody powoduje zmianę przewodności elektrycznej wynoszącą kilka rzędów wielkości. Wszelkie ślady wody zostały by wykryte.

Wykazano, że górne 2 km skorupy Księżyca są ekstremalnie wysuszone, co jest spójne z pomiarami składu skał księżycowych. Niesprawność spoiwa na tylnej stronie rzepu, który przytrzymywał osłonę zamkniętą spowodował przegrzanie urządzenia, co znacząco wpłynęło na ilość użytecznych danych zebranych w trakcie eksperymentu

3.22. Suprathermal Ion Detector Experiment (SIDE)

W celu pomiaru liczby oraz typu jonów na Księżycu wykonano dwa eksperymenty: Suprathermal Ion Detector Experiment (SIDE) (SIDE) i Cold Cathode Ion Gauge (CCIG) (CCIG). Badania te były ze sobą ściśle skorelowane i wykorzystywały jedno urządzenie połączone krótkim kablem elektrycznym.

Eksperyment SIDE miał na celu pomiar własności strumienia pola magnetycznego, liczby cząstek, gęstości, prędkości i relatywnej energii naładowanych dodatnio jonów i ich wpływu na powierzchnię Księżyca

Urządzenie pomiarowe SIDE/CCIG wyposażono w kierunkowy sensor zorientowany w płaszczyźnie ekliptycznej pod kontem 15 stopni od Księżycowego lokalnego południka. Ze względu na znaczną różnicę w długościach geograficznych miejsc lądowań, anteny urządzenia skierowano pod kątem 38 stopni na zachód (Apollo 12), 2 stopnie na wschód (Apollo 14) i 19 stopni na zachód (Apollo 15).

Zaobserwowane cząsteczki stanowiły głównie atomy wodoru jak i helu. Obserwacja ta wynikała ze składu wiatru słonecznego.

3.23. Solar Wind Composition Experiment (SWCE)

Eksperyment Solar Wind Composition Experiment (SWCE) został wykonany w celu określenia składu pierwiastków oraz izotopów gazów szlachetnych, tj. hel, neon i argon, we wietrze słonecznym.

Eksperyment składał się z folii aluminiowej o grubości 0,5 mm. Folia miała na celu uwięzienie poszczególnych cząsteczek wiatru słonecznego w grubej na kilkaset warstw atomowych strukturze. Została zaprojektowana tak, aby pozwolić na przejście promieniowaniu kosmicznemu bez interakcji.

3.24. Solar Wind Spectrometer (SWS)

Wiatr słoneczny składa się z materii stale wyrzucanej ze Słońca. Oddziaływanie to rozciąga pole magnetyczne Ziemi daleko poza samą planetę, przekraczając orbitę Księżyca. Następnie cząstki rozprzestrzeniają się dalej w Układzie Słonecznym.

Eksperyment Solar Wind Spectrometer (SWS) pozwalał na zbadanie energii, gęstości, kierunku i wariacji wyżej wymienionych parametrów. jak również na badanie pola magnetycznego Ziemi w trakcie przekraczania jego przez Księżyc.

Poza Solar Wind Spectrometer (SWS) przeprowadzono także niezależny eksperyment Solar Wind Composition Experiment (SWCE), który polegał na zebraniu próbek gazów wiatru słonecznego celem transportu ich na Ziemię i analizy laboratoryjnej.

3.25. Traverse Gravimeter Experiment (TGE)

Eksperyment Traverse Gravimeter Experiment (TGE) został wykonany w trakcie misji Apollo 17 w celu pomiaru wariacji przyspieszenia grawitacyjnego w skutek podpowierzchniowej struktury regionu Taurus-Littrow.

Polegał na pomiarach grawimetrycznych, które były wykonane w 12 miejscach pomiarowych podczas trzeciego EVA przez Gene Cernana, a następnie przetransmitowane drogą radiową na Ziemię. Interpretacja wyników wymagała znajomości topografii miejsca lądowania. Dane te zostały uzyskane za pomocą zdjęć stereofotograficznych z orbity Księżyca.

Analiza wyników wykazała, że warstwa morza bazaltowego znajdującego się w pobliżu miejsca lądowania ma miąższość 1 km. Wartość ta jest mniejsza niż określona w Lunar Seismic Profiling Experiment (LSPE)

4. Najważniejsze odkrycia

Lista najważniejszych odkryć geologicznych i geofizycznych programu Apollo wg. [13]:

1. Księżyc nie jest obiektem pierwotnym (ang. *primordial*), który wyewoluował jako planeta z wewnętrznym podziałem na warstwy podobnym do Ziemi.
2. Księżyc jest starożytnym obiektem, który przechowuje informacje o wczesnej historii układu słonecznej (pierwszy miliard lat). Informacje te są wspólne dla wszystkich planet.
3. Najmłodsze skały Księżycowe są w podobnym wieku co najstarsze minerały znalezione na Ziemi. Najwcześniejsze procesy i wydarzenia, które ukształtowały oba ciała mogą obecnie być odkryte wyłącznie na Księżycu.
4. Pochodzenie Księżyca i Ziemi jest podobne; oba ciała uformowane są na bazie różnych proporcji z tego samego źródła minerałów.
5. Księżyc nie posiada śladów życia, żadnych żyjących organizmów, skamielin, czy związków organicznych.

6. Wszystkie skały księżycowe pochodzą z procesów wysokotemperaturowych bez uczestnictwa wody lub z jej nieznacznym udziałem. Skały księżycowe dzielą się na trzy typy: bazalty, anortozyty, brekcje.
7. Na wczesnym etapie historii Księżyca jego powierzchnię stanowił "ocean magmy" rozciągający się do znacznych głębokości. Księżycowe wyżyny zawierają pozostałości pierwotnych skał o niskiej gęstości, które wypłynęły na powierzchnię oceanu magmy.
8. Zjawisko oceanu magmy poprzedzało czas wielkich zderzeń z asteroidami, które utworzyły baseny wypełnione strumieniami lawy.
9. Księżyc jest nieznacznie masowo asymetryczny. Prawdopodobnie jest to spowodowane wpływem pola grawitacyjnego Ziemi w trakcie ewolucji Księżyca. Jego skorupa jest grubsza po niewidocznej z Ziemi stronie, lecz większość basenów wulkanicznych i punktów znacznej koncentracji masy znajduje się po bliższej stronie.
10. Powierzchnia Księżyca pokryta jest stosem fragmentów skalnych i pyłu zwanego regolitem księżycowym. Regolit przechowuje unikalną historię aktywności słonecznej. Stanowi to ważny element w zrozumieniu procesów zmiany klimatu na Ziemi.

5. Zakończenie

Na przełomie pierwszej i drugiej dekady XXI wieku Księżyc ponownie stał się przedmiotem dyskusji naukowych. Po 10 miesięcznej misji orbitera Chandrayaan-1 kontrolerzy lotu Indyjskiej Organizacji Badań Kosmicznych dokonali kontrolowanego uderzenia w powierzchnię Księżyca w okolicach krateru Shackletona. Po wykonaniu analizy spektroskopowej pyłu oraz fragmentów materiału spod powierzchni odkryto obecność wody w postaci lodu [20].

W ostatnich latach można zaobserwować wyraźny trend deklarowanej chęci powrotu na Księżyc jak również późniejszej załogowej eksploracji Marsa. Opinia ta jest podzielana zarówno przez agencje kosmiczne państw o tradycjach kosmicznych jak również przez firmy prywatne.

W 2016 roku dyrektor Europejskiej Agencji Kosmicznej Johann-Dietrich Wörner wyznaczył cel dla swojej agencji stworzenia w 2030 roku bazy na Księżycu oraz rozpoczęcia permanentnej obecności człowieka na jego powierzchni [21]. Przedsięwzięcie ma być wspólnym międzynarodowym projektem, w którym mają wziąć udział państwa zrzeszone w Europejskiej Agencji Kosmicznej, Rosja oraz Chiny.

W roku 50-tej rocznicy lotu Apollo 11 wiceprezydent USA Mike Pence w imieniu rządu Stanów Zjednoczonych Ameryki zobligował NASA do załogowej eksploracji Księżyca w ciągu 5 lat [22]. Wg. obecnych planów cel ten ma zostać zrealizowany za pomocą lądownika startującego

z orbitującej wokół Księżyca stacji LOP-G (ang. Lunar Orbiting Platform Gateway). Następnym celem w latach 2030-2040 ma być załogowy lot na Marsa.

Firmy sektora prywatnego również są zainteresowane naturalnym satelitą Ziemi. Główny obszar działalności ma dotyczyć transportu dóbr i towarów oraz wsparcia agencji rządowych w załogowej eksploracji. Istotnym elementem jest także kwestia górnictwa kosmicznego, tj. pozyskiwania z Księżyca zasobów naturalnych, np. Helu-3 czy rud Toru [23]. Po przetransportowaniu na Ziemię materiały te będą miały ogromną wartość oraz wg. obecnych przewidywań przyczynią się do rewolucji energetycznej.

Zasadnym jest twierdzenie, iż wyłącznie jest kwestią czasu, kiedy rozpocznie się budowa habitatu pozaziemskiego. Aby móc zmaksymalizować efektywność działania astronautów na powierzchni konieczne będzie zautomatyzowanie bazy oraz wsparcie robotyczne podczas eksploracji.

Do czasu pierwszych lotów załogowych w XXI wieku w kierunku Księżyca musi zostać opracowany szereg technologii oraz procedur koniecznych do bezpiecznego zamieszkania tego ciała niebieskiego. Aby uzyskać wymagany poziom niezawodności i stabilności technologia przed lotem musi zostać poddana licznym testom w warunkach jak najbardziej zbliżonych do docelowych. W tym celu inżynierowie i naukowcy budują prototypy habitatów tj. *Aquarius*, Analog Astronaut Training Center (*AATC*), *Lunares*, *Hi-Seas*, *FMARS* czy *MDRS* oraz prowadzą symulacje np. w stacjach badawczych na Arktyce i Antarktydzie.

6. Bibliografia

- [1] Harasymczuk M.M. Badania geofizyczne w trakcie załogowej eksploracji Księżyca w ramach programu Apollo. ISBN 978-83-957186-1-8. Kraków 2020
- [2] Steven J. Dick. The voyages of apollo. 2006. URL: https://www.nasa.gov/exploration/whyweexplore/Why_We_20.html
- [3] Charles Meyer. The lunar sample compendium. 2009. URL: <https://curator.jsc.nasa.gov/lunar/lsc/index.cfm>
- [4] Deborah Cadbury. Space Race: The Epic Battle Between America and the Soviet Union for Dominance of Space. Harper Collins Publishers, 2006. ISBN 9780060845537.
- [5] Alexei Leonov and David Scott. Two Sides of the Moon: Our Story of the Cold War Space Race. St. Martin's Griffin, New York City, NY, 2006. ISBN 9780312308667.
- [6] Nikolai Petrovich Kamanin. Kamanin diaries (english translation of "скрытый космос"). 1999. URL: <http://www.astronautix.com/k/kamanindiaries.html>.
- [7] J.F. Kennedy. Moon speech - rice stadium. 1962. URL: <http://er.jsc.nasa.gov/seh/ricetalk.htm>.
- [8] Donn Eisele. Apollo Pilot: The Memoir of Astronaut Donn Eisele. University of Nebraska Press, Lincoln, NE, 2017. ISBN 9780803262836.
- [9] Walter Cunningham. The All-American Boys. iPicturebooks, New York City, NY, 2010. ISBN 9781876963248.

- [10] Eugene Cernan. *The Last Man on the Moon: Astronaut Eugene Cernan and America's Race in Space*. St. Martin's Press, New York City, NY, 2000. ISBN 9780312263515.
- [11] Ivan D. Ertel and Mary Louise Morse. *The apollo spacecraft - a chronology*. 2007. URL: <https://www.hq.nasa.gov/office/pao/History/SP-4009/contents.htm>.
- [12] NASA. *Apollo 12 press kit*. 1969. URL: <https://history.nasa.gov/apollo.html>.
- [13] Hamish Lindsay. *Alsep - apollo lunar surface experiments package*. 2008. URL: <https://www.hq.nasa.gov/alsj/HamishALSEP.html>.
- [14] Joseph P. Allen, Keith F. Anderson, Richard R. Baldwin, Roy L. Cox, Helen N. Foley, Robert L. Giesecke, Richard H. Koos, Robert Mercer, William C. Phinney, Floyd I. Roberson, and Scott H. Simpkinson. *Apollo 15 - preliminary science report*. 1972.
- [15] Robin Brett, Anthony W. England, Jack E. Calkins, Robert L. Giesecke, David N. Hohnan, Robert M. Mercer, Michael J. Murphy, and Simpkinson Scott H. *Apollo 16 - preliminary science report*. 1972.
- [16] Robert A. Parker, Richard R. Baldwin, Robin Brett, Jerry D. Fuller, Robert L. Giesecke, John B. Hanley, David N. Holman, Robert M. Mercer, Susan N. Montgomery, Michael J. Murphy, and Scott H. Simpkinson. *Apollo 17 - preliminary science report*. 1973.
- [17] Anthony J. Calio, John W. Harris, John H. Langford, R. Mercer, Jamie L. Moon, Scott H. Simpkinson, William K. Stephenson, Jeffrey L. Warner, and Julian M. West. *Apollo 12 - preliminary science report*. 1970.
- [18] Arlin Crotts. *Water on the moon, i. historical overview*. *Astronomical Review*, 6:4–20, 2011. URL: <https://curator.jsc.nasa.gov/lunar/lsc/index.cfm>, doi:10.1080/21672857.2011.11519687.
- [19] Philip K. Chapman, Michael B. Duke, Helen N. Foley, Jackson Harris, Frank J. Herbert, Bob Mercer, Scott H. Simpkinson, Paul J. Stull, and John M. Ward. *Apollo 14 - preliminary science report*. 1971.
- [20] Arlin Crotts. *Water on the moon, i. historical overview*. *Astronomical Review*, 6:4–20, 2011. URL: <https://curator.jsc.nasa.gov/lunar/lsc/index.cfm>, doi:10.1080/21672857.2011.11519687.
- [21] Johann-Dietrich Wörner. *Moon village: a vision for global cooperation and space 4.0*. 2016. URL: <http://blogs.esa.int/janwoerner/2016/11/23/moon-village/>.
- [22] Bettina Inclán. *Nasa administrator statement on return to moon in next five years*. 2019. URL: <https://www.nasa.gov/press-release/nasa-administrator-statement-on-return-to-moon-in-next-five-years>.
- [23] *The Estimation of Helium-3 Probable Reserves in Lunar Regolith*, 2007. URL: <http://www.lpi.usra.edu/meetings/lpsc2007/pdf/2175.pdf>.